

Лабораторная работа № 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ МЕТОДОМ ПРОТОЧНОГО КАЛОРИМЕТРИРОВАНИЯ

Лабораторная работа разработана сотрудниками кафедры ФН-4 Мытищинского филиала МГТУ
им. Н. Э. Баумана (МГУЛ)

проф. д.т.н. Полуэктова Н. П.
доц. к.ф.-м.н. Козловская Е. П.
доц. к.т.н. Усатов И. И.
вед. инж. Евстигнеев А. Г.

Москва 2017

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Титульный лист лабораторной работы согласно образцу.
2. Конспект теоретической части работы.
3. Методику эксперимента и краткое описание лабораторной установки.
4. Заполненные таблицы с экспериментальными данными.
5. Обработку экспериментальных данных согласно методическим указаниям в данной работе. В случае обработки данных эксперимента в excel – распечатку скриншота и файл с результатами обработки.
6. Вывод по выполненной работе, содержащий: цель работы, сравнение результатов эксперимента по определению c_p с теоретическим значением c_p из молекулярно-кинетической теории теплоемкости идеального газа и справочными данными по c_p для воздуха.

Цель работы: определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Методика эксперимента

Теплоемкостью тела называется физическая величина, численно равная отношению количеству теплоты δQ , сообщаемой телу, к изменению dT температуры тела в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1)$$

Теплоемкость тела зависит от его химического состава, массы тела и его термодинамического состояния, а также от вида процесса изменения состояния тела, в котором поступает теплота δQ .

Тепловые свойства однородных тел характеризуются понятиями удельной c и молярной C теплоемкости. Теплоемкость c тела массой в $m = 1$ кг называют удельной (измеряется в единицах [Дж/(кг · К)], теплоемкость одного моля вещества C называют молярной (измеряется в единицах [Дж/(моль · К)]). Очевидно, что $C = M \cdot c$, где M – молярная масса вещества.

Таким образом, связь между δQ и dT для однородного тела имеет вид:

$$\delta Q = m \cdot c \cdot dT \quad (2)$$

Опытным путем установлено, что у многих тел теплоемкость в широких температурных интервалах практически не зависит от температуры. Поэтому уравнение (2) можно записать в виде:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3)$$

Теплоемкость газа существенно зависит от того, при каких условиях он нагревается: при постоянном объеме или при постоянном давлении. В первом случае все сообщенное газу количество теплоты δQ идет только на увеличение внутренней энергии газа dU , так как объем газа не изменяется. Во втором случае требуется еще дополнительное количество теплоты на совершение работы расширения газа, так как неизменность давления обеспечивается увеличением объема газа. Поэтому у газа различают две молярные теплоемкости при постоянном объеме C_v и постоянном давлении C_p и удельные c_v, c_p .

Установим связь между молярными теплоемкостями. Первое начало термодинамики при изобарном процессе для одного моля газа имеет вид:

$$\delta Q_p = dU_M + \delta A, \quad (4)$$

где δQ_p – количество теплоты, сообщаемой одному молю газа при постоянном давлении ($p = const$); dU_M – изменение внутренней энергии одного моля газа; $\delta A = p \cdot dV_M$ – элементарная работа, dV_M изменение объема моля газа. Разделив это выражение на dT , получим формулу для молярной теплоемкости газа C_p :

$$C_p = \frac{dU_M}{dT} + p \cdot \frac{dV_M}{dT} \quad (5)$$

Если предположить, что газ идеальный, то в соответствии с уравнением состояния Менделеева – Клапейрона объем одного моля газа равен:

$$V_M = R \cdot T / p, \quad (6)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

Продифференцировав это выражение по T , в предположении

что $p = const$ и, подставляя в (5), получим, что эти две теплоемкости связаны уравнением:

$$C_p - C_v = R \quad (7)$$

Уравнение (7) называется уравнением Майера. Таким образом из уравнений (4), (5), (7) следует, что работа, совершаемая молем ($m/M = 1$ моль) идеального газа при повышении его температуры на один кельвин при постоянном давлении, равна газовой постоянной R . Из

классической теории теплоемкостей идеального газа следует, что $C_v = \frac{i}{2} \cdot R$, тогда из (7) имеем:

$$C_p = \frac{i+2}{2} \cdot R, \quad c_p = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{M}, \quad (8)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

Воздух, являющийся исследуемым веществом в данной работе, представляет собой смесь газов, основными компонентами которой являются двухатомные газы азот и кислород. Поэтому для воздуха $i = 5$.

Приборы для измерения теплоемкости – калориметры – являются важным элементом в физико-химических исследованиях. Существует большое число калориметров разного типа, предназначенных для измерения теплоемкости веществ в агрегатных состояниях и разных физических условиях (температурах, давлениях и т.д.). Для измерения теплоемкости газов нашли широкое применение проточные калориметры.

Проточный калориметр в самом простом варианте представляет собой термоизолированную трубку, по которой непрерывно прокачивается исследуемый газ с постоянным расходом. Согласно уравнению Бернулли, в установившемся потоке идеального газа полное давление постоянно на любом поперечном сечении потока. Внутри термоизолированной трубки находится нагреватель известной мощности (спираль, нагреваемая током). Тогда газ, при течении через трубку будет нагреваться, и его температура T_2 на выходе из калориметра окажется больше, чем на входе T_1 . При этом в силу малости гидравлических потерь давление текущего газа можно считать постоянным, а, следовательно, подвод теплоты к газу в такой системе будет происходить при условии $p = const$. И это давление равно давлению, под которым газ подается в термоизолированную трубку.

Тогда для массы m газа, прошедшей через поперечное сечение трубки за время τ можно записать:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (9)$$

где Q – количество теплоты, сообщаемой газу.

Разделив левую и правую часть этого соотношения на время τ , получим:

$$N = c_p \cdot G \cdot \Delta T, \quad (10)$$

где

$N = \frac{Q}{\tau}$ – тепловая мощность, поступающая к газу от нагревателя;

$G = \frac{m}{\tau} = \Delta m$ – массовый расход газа (масса газа, проходящая через поперечное сечение канала трубки за одну секунду);

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность температур газа на выходе и входе трубки.

В данной работе нагрев газа осуществляется электрическим током, проходящим по нихромовой проволоке, намотанной на керамический стержень. Если такую систему поместить в теплонепроницаемую (адиабатную) оболочку, то вся электрическая мощность, выделяемая в проволоке, пойдет на нагрев газа. Тогда удельная теплоемкость газа может быть рассчитана из (10):

$$c_p = \frac{N}{\Delta m \cdot \Delta T} \quad (11)$$

В настоящей работе экспериментально определяется теплоемкость воздуха c_p при атмосферном давлении, при котором воздух по своим свойствам близок к идеальному газу. Значения величин N , Δm и ΔT определяются экспериментально.

Описание установки

Экспериментальный стенд выполнен в виде стандартного модуля, внутри которого смонтирована установка, а на лицевой панели – измерительные приборы, элементы системы включения и управления. Фотография установки представлена на рис.1, а схема рабочего участка установки на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что воздух прокачивается с помощью компрессора 1 через холодильник 2 и

ротаметр 3 в проточный калориметр, состоящий из внутренней трубки, заключенной в вакуумированную оболочку – сосуд Дьюара 4. В трубке находится нихромовый нагреватель, к которому последовательно подключено образцовое сопротивление $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$. Протекая через трубку с нагревателем 5, воздух нагревается. Объемный расход воздуха G измеряется поплавковым расходомером (ротаметром 3), измерения с которого снимаются в делениях, а затем пересчитываются на массовый расход воздуха Δm (кг/с).

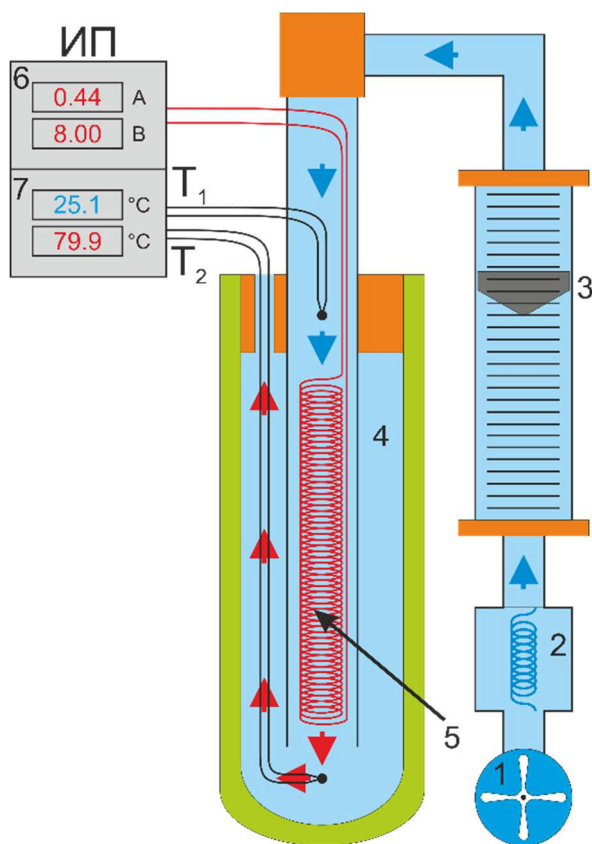


Рис. 2 Схема установки.

1 - компрессор, 2 - холодильник, 3 - ротаметр, 4 - сосуд Дьюара, 5 - нагреватель, 6 - источник питания, 7 - измеритель температур, T_1 - термомпара на входе T_2 - термомпара на выходе.



Рис. 1 Фотография экспериментальной установки

1 - тумблер «Сеть», 2 - тумблер включения компрессора, 3 - тумблер включения источника питания, 4 - измеритель температур, 5 - тумблер включения измерителя температуры, 6 - ротаметр.

Наличие адиабатной оболочки позволяет практически считать, что вся мощность, выделяемая в нагревателе, идет на нагрев прокачиваемого через трубку газа. Мощность N , выделяемая нагревателем (количество тепла за 1 с) определяется как:

$$N = U_H \cdot I, \quad (12)$$

где U_H – напряжение, подводимое к нагревателю; I – сила тока через нихромовую проволоку нагревателя. Напряжение на источнике питания U и сила тока I определяются по шкале прибора 6 источника питания. Тогда:

$$U_H = U - I \cdot R_0, \quad (13)$$

где $I \cdot R_0$ – падение напряжения на образцовом сопротивлении R_0 .

Температуры воздуха на входе T_1 и выходе T_2 из трубки измеряют с помощью термоэлектрических датчиков (хромель-копелевые термомпары), электрический сигнал от которых преобразуется и высвечивается на дисплее измерителя температур 7 в градусах Цельсия. Тогда из

уравнений (11), (12) и (13) следует, что удельная теплоемкость при $p = const$:

$$c_p = \frac{(U - I \cdot R_0) \cdot I}{\Delta m \cdot (T_2 - T_1)} \quad (14)$$

Порядок выполнения работы

1. На установке рис. 1 поверните ручку регулятора напряжения на источнике тока 3 против часовой стрелки до упора. Включите электропитание установки (тумблер 1 сеть), измеритель температур 4 – тумблером 5, компрессор – тумблером 2.
2. С помощью регулятора подачи воздуха компрессора (задняя панель установки) установите поток воздуха на ротаметре 6 в пределах 40 - 70 делений. И этот поток поддерживайте в течение всего эксперимента.
3. Включите питание нагревателя кнопочным выключателем на источнике питания 3. С помощью регулятора напряжения установите начальное напряжение на источнике около $U = 4$ В, отслеживая его значение по шкале прибора.
4. После включения установки, в которой исследуются тепловые процессы, требуется некоторое время, в течение которого происходит стабилизация измеряемых величин. Нестационарный период прогрева элементов установки постепенно сменяется стационарным и измеряемые величины становятся достоверными. После установления стационарного режима (не менее 5 мин. после включения нагревателя) снимите значение силы тока I и напряжения U по шкале прибора. Данные измерений U и I запишите в Табл. 1
5. Снимите показания температур T_1 и T_2 термопар по измерителю 4 и запишите в Табл. 1.
6. Снимите показания объемного расхода воздуха G по ротаметру 6 и, используя градуировку ротаметра рис. 3, пересчитайте в $G_{гр}$ л/ч и затем переведите в $М^3/с$. Данные запишите в Табл. 1.
7. Повторите измерения не менее 7 раз при значениях $U = 4 - 12$ В при неизменном потоке воздуха на ротаметре. Данные измерений запишите в Табл. 1.
8. Снимите показания давления p_d и температуры T_d по барометру и термометру в лаборатории. Данные запишите в Табл. 1
9. Вычислите, выделяемую в нагревателе мощность, и запишите в Табл. 1.

$$N = U_H \cdot I = (U - I \cdot R_0) \cdot I, \text{ где } R_0 = 0,1 \text{ Ом.}$$

Таблица 1.

$P_d = \dots$ мм. рт. ст. = \dots Па (1 мм. рт. ст = 133,32 Па); $T_d = \dots$ К;						
$G = \dots$ делен; $G_{гр} = \dots$ л/ч = \dots М ³ /с; $G = \dots$ М ³ /с; $\rho = \dots$ кг/М ³ $\Delta m = \dots \cdot 10^{-5}$ кг/с.						
№	T_1 °С	T_2 °С	ΔT К	U В	I А	N Вт
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

10. Рассчитайте массовый расход воздуха $\Delta m = G \cdot \rho$, где ρ – плотность воздуха.

Плотность воздуха рассчитайте для текущих условий эксперимента давлении p_d и температуре T_d на основании закона Менделеева – Клапейрона:

$$\rho = \frac{p_d \cdot M}{R \cdot T_d}, \text{ где } M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

При расчете следует учитывать, что при определении объемного расхода воздуха шкала прибора ротаметра была отградуирована при $p = 755$ мм. рт. ст. и $T = (24 \text{ °С} + 273.15)$ К. Поэтому

при измерении расхода воздуха в условиях отличных от условий градуировки необходимо ввести следующую поправку:

$$G = G_{гр} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{гр}}{\rho}} = G_{гр} \cdot \sqrt{\frac{p_{гр} \cdot T_l}{p_l \cdot T_{гр}}},$$

где G и ρ – объемный расход и плотность воздуха в условиях эксперимента, $G_{гр}$ и $\rho_{гр}$ – при градуировке ротаметра. Данные запишите в Табл. 1.

Обработка экспериментальных результатов

А. Графический метод.

1. Уравнение (11) представьте в виде уравнения прямой линии $Y = B \cdot X + A$,

$$N = c_p \cdot \Delta t \cdot \Delta T, \quad (14)$$

где $Y = N$; $X = \Delta T$; $B = c_p \cdot \Delta t$ – угловой коэффициент.

2. Постройте график зависимости N от ΔT . Проведите через полученные точки прямую, проходящую максимально близко к построенным точкам и чтобы суммарное отклонение точек, лежащих выше проведенной прямой, равнялось суммарному отклонению точек лежащих ниже этой прямой.
3. Рассчитайте угловой коэффициент B построенной прямой.
4. Рассчитайте погрешность углового коэффициента ΔB .

Для этого выбирается экспериментальная точка, имеющая наибольшее отклонение от графика в вертикальном направлении ΔY_{max} . Тогда относительная погрешность $\delta B_Y = \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_Y = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{max} - Y_{min}}$, где $(Y_{max} - Y_{min})$ – измеренные max и min значения Y (см. табл. 1).

Аналогично вычисляется относительная погрешность $\delta B_X = \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_X = \frac{\Delta X_{max}}{X_{max} - X_{min}}$, где ΔX_{max} – наибольшее отклонение от графика в горизонтальном направлении, а $(X_{max} - X_{min})$ – измеренные max и min значения X (см. табл. 1).

Следовательно $\delta B = \frac{\Delta B}{B} = \sqrt{\delta B_X^2 + \delta B_Y^2}$.

Отсюда $\Delta B = \delta B \cdot B$.

5. Зная, что $B = \langle c_p \rangle \cdot \Delta t$, рассчитайте среднее значение удельной теплоемкости $\langle c_p \rangle = \frac{B}{\Delta t}$
6. Оцените погрешность: $\Delta c_p = \langle c_p \rangle \cdot \delta B$.
7. По формуле (8) рассчитайте теоретическое значение $c_{p(теор)}$. В справочнике по физике найдите значение $c_{p(спр)}$ для воздуха.
8. Окончательный результат представьте в виде:

$$c_p = \langle c_p \rangle \pm \Delta c_p; \quad c_{p(теор)} = \dots; \quad c_{p(спр)} = \dots$$

Б. Аналитический метод.

1. Уравнение (11) представьте в виде уравнения прямой линии $Y = B \cdot X + A$,

$$N = c_p \cdot \Delta t \cdot \Delta T, \quad (14)$$

где $Y = N$; $X = \Delta T$; $B = c_p \cdot \Delta t$ – угловой коэффициент.

2. Методом наименьших квадратов вычислите B и определите погрешность среднеквадратичного отклонения S_B величины B :

$$B = \frac{\langle X \cdot Y \rangle - \langle X \rangle \cdot \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}$$

$$S_B = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \cdot \sqrt{\frac{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} - B^2}$$

3. Зная, что $B = \langle c_p \rangle \cdot \Delta t$, рассчитайте среднее значение удельной теплоемкости $\langle c_p \rangle = \frac{B}{\Delta t}$
4. Оцените погрешность Δc_p для $\langle c_p \rangle$:

$$\Delta c_p = \frac{S_B}{B} \cdot \langle c_p \rangle$$

5. По формуле (8) рассчитайте теоретическое значение $c_{p(\text{теор})}$. В справочнике по физике найдите значение $c_{p(\text{спр})}$ для воздуха.
6. Окончательный результат представьте в виде:

$$c_p = \langle c_p \rangle \pm \Delta c_p; \quad c_{p(\text{теор})} = \dots; \quad c_{p(\text{спр})} = \dots$$

Контрольные вопросы

1. Дайте определения теплоемкости вещества, удельной и молярной теплоемкости. Какова связь между удельной и молярной теплоемкостями.
2. Как Вы понимаете утверждение, что теплоемкость газа есть функция процесса?
3. Выведите формулу для молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении. Рассчитайте значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.
4. Объясните метод проточного калориметрирования для измерения удельной теплоемкости газов при постоянном давлении. Почему нагревание газа при его течении в трубке можно рассматривать как процесс при постоянном давлении?
5. Дайте определение массовому расходу воздуха. Как определяется массовый расход в данном эксперименте?
6. Какими факторами можно объяснить различие в значениях удельной теплоемкости воздуха, полученных экспериментально и теоретически?

Литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк. 2015. - 608с.: ил.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. испр. – М.: Высш. шк. 2015. - 542 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для втузов. Кн.3 Молекулярная физика и термодинамика. – 5-е изд. перераб. М.: Наука. Физматлит. 2000. - 208с.

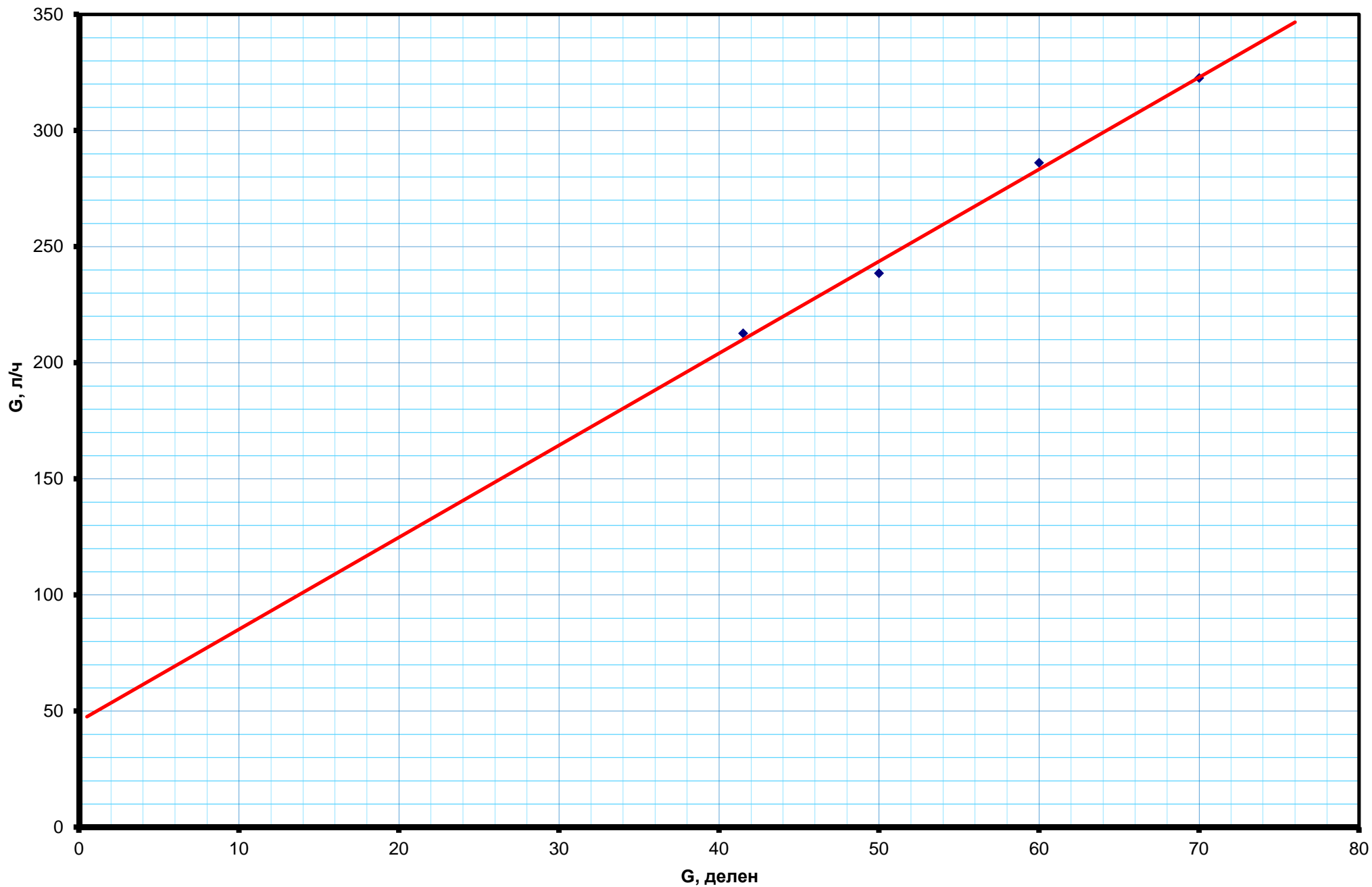


Рис. 3. Градуировка ротаметра.